



**А.П. Панычев
А.П. Пупышев
Д.В. Кутузов**

**УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ
РОТОРНО-ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ
MAZDA RX-8**

Екатеринбург
2012

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВПО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра сервиса и эксплуатации транспортных
и технологических машин

**А.П. Панычев
А.П. Пупышев
Д.В. Кутузов**

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ РОТОРНО-ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ MAZDA RX-8

Методические указания к выполнению лабораторной работы
для студентов очной и заочной форм обучения

Направления 190600 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов и 190109 Наземные транспортно-технологические средства
Дисциплины «Конструкция автомобилей и тракторов», «Эксплуатация автомобилей и тракторов», «Развитие и современное состояние мирового автомобиле- и тракторостроения», «Техническая эксплуатация силовых агрегатов и трансмиссий», «Конструкция и эксплуатационные свойства транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования (ТиТМО) »

Екатеринбург
2012

Электронный архив УГЛТУ

Печатается по рекомендации методической комиссии ЛМФ.
Протокол № 1 от 30 сентября 2011 года.

Рецензент канд. техн. наук, доцент Е.Г. Есюнин

Редактор Р.В. Сайгина
Оператор компьютерной верстки Т.В. Упорова

Подписано в печать 20.09.2012	Поз. № 59
Плоская печать	Тираж 50 экз.
Заказ №	Цена 6 руб. 80 коп.
Формат 60×84 1/16	
Печ. л. 1,16	

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ
Отдел оперативной полиграфии УГЛТУ

Введение

Роторно-поршневой двигатель Renesis имеет очень интересную историю. Начиная со своего изобретения и заканчивая тем фактом, что «Mazda RX-8» в настоящий момент единственный серийный автомобиль в мире, который выпускается с двигателем такого типа. Конструкция роторно-поршневого двигателя разработана в 1957 г. инженером компании NSU Вальтером Фройде. Двигатель разрабатывался в соавторстве с Феликсом Ванкелем – немецким конструктором двигателей, которому и принадлежала идея данной конструкции двигателя. В табл. 1 приведены технические характеристики двигателя

Таблица 1

Технические характеристики двигателя

Mazda RX-8 (предварительные данные)

	Standar Power	High Power
Двигатель	роторно-поршневой, двухсекционный, с впрыском топлива	
Рабочий объем, см ³	2х654	2х654
Приведенный рабочий объем, см ³	2616	2616
Степень сжатия	10,0	10,0
Число окон впуска и выпуска	8	10
Максимальная мощность, л.с, мин ⁻¹	192/7000 (210/7200)*	240/8200 (250/8500)*
Максимальный крутящий момент, Нм/мин ⁻¹	220/5000	211/5500

1. Принцип работы роторно-поршневого двигателя (РПД)

В классическом четырехтактном двигателе один и тот же цилиндр используется для различных операций: впуск, сжатие, сжигание и выпуск.

В роторном же двигателе каждый процесс выполняется в отдельном отсеке камеры. Эффект мало чем отличается от деления цилиндра на четыре отсека для каждой из операций. В поршневом двигателе давление, возникающее при сгорании смеси, заставляет поршни двигаться вперед и назад в своих цилиндрах. Шатуны и коленчатый вал преобразуют это толкательное движение во вращательное, необходимое для движения автомобиля.

В роторном двигателе нет прямолинейного движения, которое надо было бы переводить во вращательное. Давление образуется в одном из отсеков камеры, заставляя ротор вращаться, что снижает вибрацию и повышает потенциальную величину оборотов двигателя. Результат этого – большая эффективность и меньшие размеры, чем у обычного поршневого двигателя при той же мощности. На рис. 1 приведена принципиальная схема работы РПД.

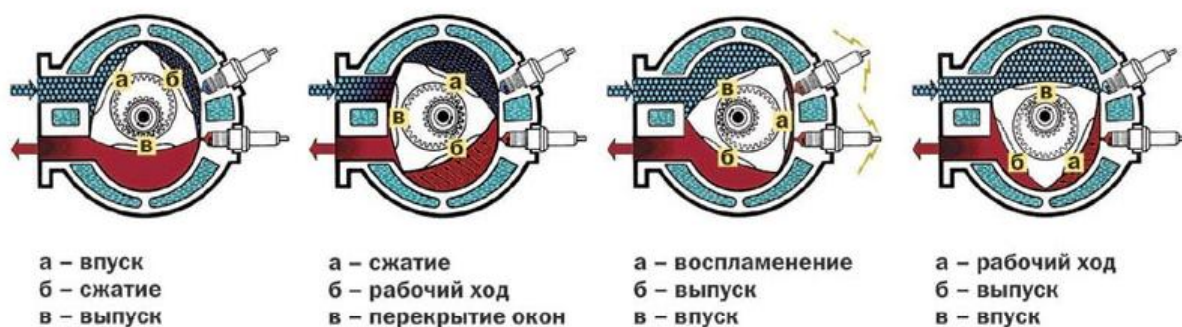


Рис.1. Схема работы РПД

Вращение ротора (он же поршень) задается двумя деталями — эксцентриковым валом (он на схеме не показан) и шестерней, зафиксированной на статоре двигателя. Вместе они заставляют ротор совершать сложное планетарное движение, при котором он обкатывает статор своими ребрами. Одновременно происходит три разных такта. Две свечи необходимы, чтобы «прожечь» длинную камеру сгорания, и срабатывают последовательно. Полный четырехтактный цикл происходит за 120° поворота ротора, и за это время эксцентриковый вал делает один оборот, а не два, как на обычных поршневых «четырехтактниках». Поэтому двухсекционный РПД объемом $2 \times 654 \text{ см}^3$ эквивалентен поршневой «шестерке» объемом 2,6 л.

Впуск

В трех рабочих полостях отдельные фазы рабочего процесса сдвинуты друг относительно друга на 120° угла поворота ротора. Фазы начала и конца каждого такта определяются положением вершин ротора относительно впускного и выпускного окон. В отличие от поршневого двухтактного двигателя окна в корпусе роторно-поршневого двигателя все время открыты и соединяют соответствующие каналы с какой-либо полостью. Вследствие этого отдельные фазы рабочих процессов в смежных полостях роторно-поршневого двигателя частично перекрываются. Центральный угол поворота вектора равен углу поворота ротора относительно корпуса. Учитывая, что эксцентриковый вал вращается в 3 раза быстрее ротора, все углы поворота ротора необходимо умножить на 3, чтобы определить углы поворота эксцентрикового вала.

Во время начальной стадии процесса наполнения возможна продувка полости, в которой заканчивается расширение. Процесс наполнения начинается с момента открытия любой вершиной треугольного ротора впускного окна. При прохождении вершиной ротора зоны впускного окна выпускное окно все время полностью открыто. Продувка заканчивается в момент отсечки выпускного окна вершиной ротора. Угол поворота ротора, соответствующий продувке, составляет около 40° и определяется положением внутренних кромок впускного и выпускного окон.

После отсечки вершиной ротора выпускного окна начинается наполнение при увеличении объема полости. В конце этого периода, занимающего примерно 100° угла поворота ротора, скорость изменения объема полости уменьшается. Так как в этот момент впускные окна еще открыты, а скорость смеси во впускном трубопроводе достаточно велика, происходит дозарядка рабочего объема. Использование динамических явлений во впускном трубопроводе позволяет получать достаточно высокий коэффициент наполнения даже при высоком числе оборотов ротора.

Сжатие

Сжатие рабочей смеси начинается после перекрытия вершиной ротора впускного окна и заканчивается при достижении минимального объема. Процесс сжатия характеризуется несколько большими утечками рабочего тела через уплотнения ротора, чем в поршневом двигателе, и меньшей теплоотдачей в стенки. По экспериментальным данным показатель политропы сжатия в роторно-поршневых двигателях $n = 1,36\text{--}1,39$, т.е. несколько больше, чем в поршневом двигателе с внешним смесеобразованием. Сжатие смеси соответствует примерно 80° угла поворота ротора. В конце процесса сжатия в течение времени, соответствующего примерно 10° угла поворота ротора, одновременно с уменьшением объема полости происходит первая фаза сгорания смеси.

В роторно-поршневых двигателях, изменяя форму ротора и параметр формы эпитрохоиды, можно получить степень сжатия (ϵ) до 11–12. Однако при таком увеличении степени сжатия значительно ухудшаются формы камеры сгорания и соответственно снижается экономичность. Минимальный удельный расход топлива получается при $\epsilon = 9\text{--}11$. Практически степень сжатия выбирают в пределах 8,5–10,0.

Сгорание

Процесс сгорания в роторно-поршневых двигателях начинается за $10\text{--}15^\circ$ угла поворота ротора до момента достижения минимального объема камеры сгорания. При достижении минимального объема камера сгорания представляет собой узкую щель с двумя клинообразными окончаниями,

сжатую в средней части выступом эпитрохоидального профиля корпуса двигателя. При движении ротора отношение объемов двух частей камеры сгорания изменяется и рабочее тело перетекает из одной части в другую. Для уменьшения потерь при перетекании в теле ротора имеется выемка.

Воспламенение смеси производится одной или двумя свечами зажигания. В случае одной свечи зажигания ее устанавливают в части камеры сгорания, расположенной ближе к выпускным окнам двигателя. Фронт пламени движется навстречу потоку смеси, вытесняемой из уменьшающейся части камеры сгорания. При использовании двух свечей зажигания одну из них устанавливают в одной части камеры сгорания, а другую – в другой.

К особенностям роторно-поршневого двигателя следует отнести малую скорость изменения объема камеры сгорания по углу поворота вблизи верхней мертвой точки (в. м. т.). Это приводит к тому, что сгорание успевает закончиться к моменту значительного увеличения скорости нарастания объема. Хотя сгорание в этих двигателях происходит по времени медленнее, чем в поршневых, но в связи с более медленным ростом объема это не вызывает значительного ухудшения индикаторного к. п. д.

Узкая щелевидная камера сгорания с развитыми поверхностями уменьшает склонность двигателя к детонации. Как показывают эксперименты, роторно-поршневые двигатели могут работать на низкооктановых топливах (с октановым числом 66 или 72) без детонации при степени сжатия 9. Зона корпуса двигателя, в которой происходит сгорание смеси, не омывается холодными газами при наполнении, поэтому температура стенки корпуса в этом месте выше, чем у поршневого двигателя. Количество теплоты, отводимой от стенки за период сгорания, несмотря на увеличение времени сгорания, возрастает сравнительно мало из-за высоких температур стенки корпуса и ротора двигателя, а следовательно, уменьшается теплоотвод под ним.

Расширение

Когда сгорание в основном закончилось, начинается расширение рабочего тела (период расширения рабочего тела). Период расширения газов соответствует примерно 90° угла поворота ротора. Затем открывается выпускное окно и во время поворота ротора примерно на 20° происходит свободный выпуск газов.

Выпуск

Выпуск газов можно разбить на четыре периода: первый – от момента открытия выпускного окна до достижения максимального объема полости; второй – принудительный выпуск, протекает при уменьшающемся объеме полости до момента открытия впускного окна (примерно 60° угла поворота ротора); третий – выпуск, совмещенный с предварением впуска,

происходит при уменьшающемся объеме полости, но при наличии продувки; четвертый – окончание выпуска, совмещен со свободным выпуском из следующей полости (продолжительность этого периода соответствует примерно 10° угла поворота ротора). Общая продолжительность процесса выпуска около 120° угла поворота ротора. По экспериментальным данным средний показатель политропы расширения меньше, чем в бензиновых поршневых двигателях, и составляет 1,2–1,15, что свидетельствует о подводе значительного количества теплоты в процессе расширения. Температура конца расширения несколько выше, чем в поршневых двигателях, т. е. $T = 1850\text{--}1900^\circ\text{K}$.

2. Конструкция двухсекционного роторно-поршневого двигателя

Статор (Корпус ротора) в форме трохоиды (рис. 2а, рис. 2б), который обеспечивает область перемещения ротора (эпитрохоида – геометрическая линия, создаваемая точкой одной окружности, которая катится без проскальзывания по внешней стороне другой окружности большего диаметра).

Статор алюминиевый, с залитой стальной хромированной гильзой. Форма разработана так, чтобы три вершины ротора всегда находились в контакте со стенкой камеры, образуя три закрытых объема газа. В каждой части камеры происходит один из четырех тактов: впуск; сжатие; сгорание; выпуск.



Рис. 2а. Стенд РПД Ванкеля в лаборатории кафедры сервиса и эксплуатации транспортных и технологических машин УГЛТУ



Рис. 2б. РПД Ванкеля:

1 – статор; 2 – кожухи ротора (передний, задний, промежуточный); 3 – ротор;
4 – эксцентриковый вал; 5 – стационарная шестерня

Отверстия для впуска и выпуска находятся в стенках камеры и на них отсутствуют клапаны. Выхлопное отверстие соединено непосредственно с выхлопной трубой, а впускное напрямую подключено к газу.

Роторы (и шестерни внутреннего зацепления на роторах) изготавливают из чугуна для предотвращения поломки зубьев неподвижной шестерни. Роторы изготавливаются пустотелыми с проточками под своеобразные камеры сгорания, также для уменьшения веса роторов была уменьшена толщина внутренних ребер. На торцах ротора имеются выточки под уплотнительные штифты и торцевые уплотнительные пластины. Во внутреннюю поверхность ротора запрессовывается роторный подшипник.

Ротор (рис. 3) имеет форму треугольника с дугообразными сторонами. При вращении ротор совершает сложное планетарное движение. Ротор вращается вместе с эксцентриковым валом и одновременно из-за обтекания неподвижной шестерни, закрепленной на боковом корпусе двигателя, посредством шестерни внутреннего зацепления вращается вокруг своей оси. Отношение числа зубьев шестерни внутреннего зацепления ротора и неподвижной шестерни – 3:2 (51:34).

При вращении ротора три его вершины постоянно касаются поверхности статора, образуя рабочие камеры, объем которых постоянно изменяется. За один оборот объем каждой рабочей камеры ротора меняется 4 раза от минимального до максимального, что обеспечивает возможность протекания четырехтактного цикла в каждой из трех рабочих камер за один оборот ротора или за три оборота эксцентрикового вала (так как ротор вращается

в три раза медленнее эксцентрикового вала). В соседних камерах совершаются аналогичные циклы со сдвигом на 120° .

Таким образом, за один оборот ротора совершается три рабочих хода или один рабочий ход на каждый оборот эксцентрикового вала. Здесь нужно заметить, что в роторном, как и в поршневом двигателе, на тактах впуска и рабочего хода объем между вершинами ротора увеличивается, а на тактах сжатия и выпуска объем уменьшается. Открытие и закрытие впускных и выпускных окон осуществляется боковой поверхностью ротора.

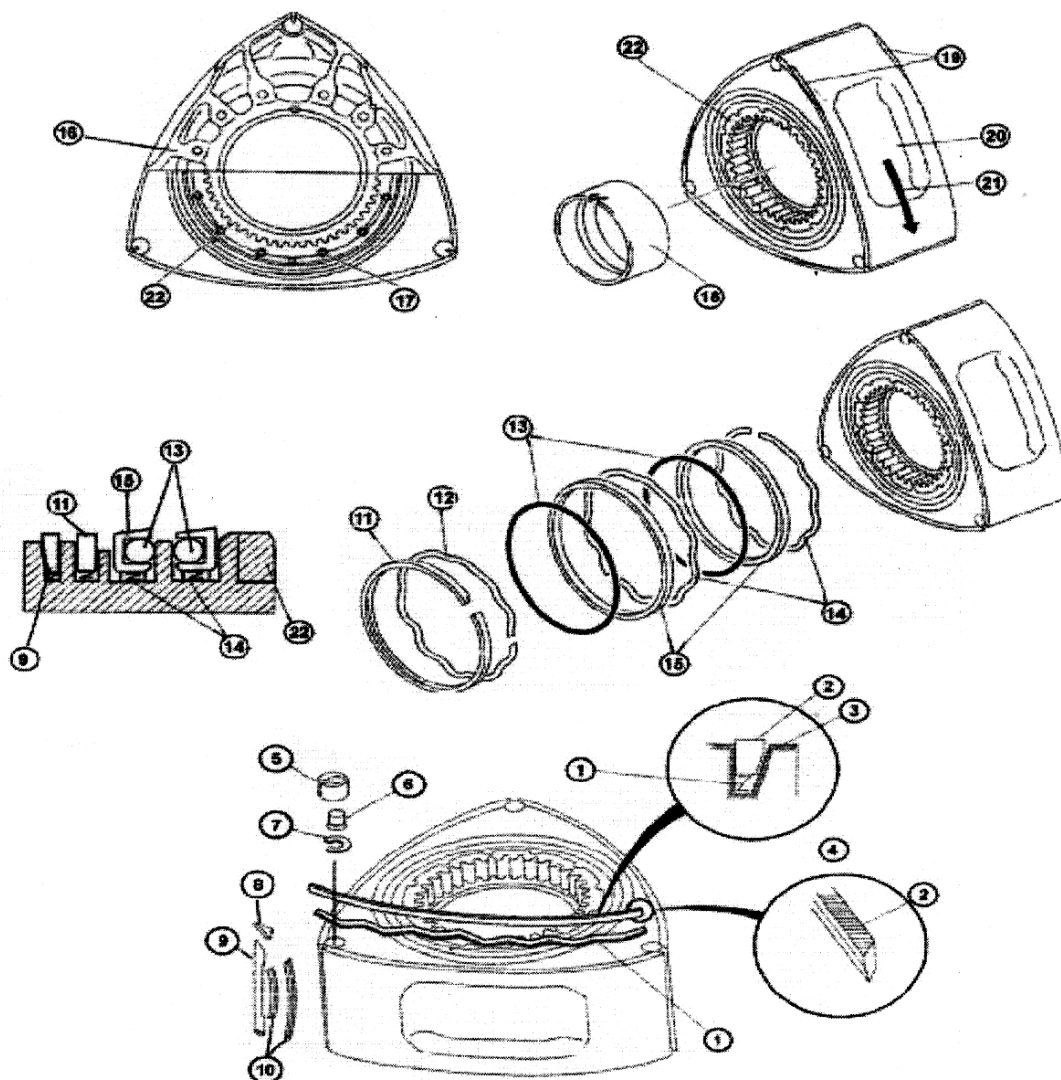


Рис. 3. Ротор и система уплотнений рабочих камер:

1 – расширитель торцевой уплотнительной пластины; 2 – торцевая уплотнительная пластина; 3; 16 – ротор; 4 – цветная метка; 5 – уплотнительный штифт; 6 – пробка; 7 – пружинная шайба; 8 – боковой элемент радиального уплотнения; 9 – радиальная уплотнительная пластина; 10 – расширители радиальной уплотнительной пластины; 11 – компрессионное кольцо; 12 – расширитель компрессионного кольца; 13 – уплотнительные кольца; 14 – пружина маслосъемного кольца; 15 – маслосъемное кольцо; 17 – пружинная вставка; 18 – роторный подшипник; 19 – выточки; 20 – выточка для камеры сгорания; 21 – направление вращения ротора; 22 – роторная шестерня внутреннего зацепления

Боковые крышки статора – (передний кожух, промежуточный кожух, задний кожух) – полностью прикрывают стороны секции так, чтобы камера сгорания была герметична. Статор и боковые крышки по существу – коробка для ротора (рис. 2).

Стационарная шестерня – шестерня, жестко закрепленная на боковой крышке, которую обкатывает ротор (рис. 2).

Эксцентрикковый вал – вал с двумя эксцентриковыми выступами, которые передают движение роторов к ведомому валу (рис. 2). Каждый ротор надевается на один из этих выступов. Выходной вал является аналогом коленчатого вала в поршневых двигателях. Каждый ротор движется внутри камеры и толкает свой кулачок. Так как кулачки установлены несимметрично, сила, с которой ротор на него давит, создает крутящий момент на выходном валу, заставляя его вращаться.

Нужно отметить, что основные части, указанные выше, присутствуют в каждом роторном двигателе, независимо от количества секций. Большинство двигателей имеет два ротора, но производились и трех и четырехсекционные.

Роторный двигатель состоит из слоев. Двухроторные двигатели состоят из пяти основных слоев, которые удерживаются вместе благодаря длинным болтам, расположенным по кругу (рис. 4).

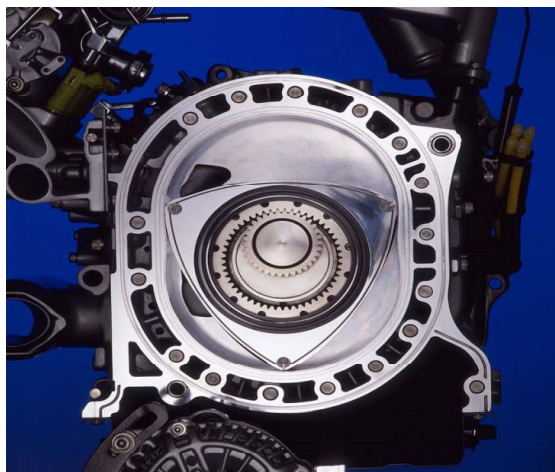


Рис. 4. Двухсекционный РПД Mazda RX-8 Renesis

Охлаждающая жидкость протекает через все части конструкции.

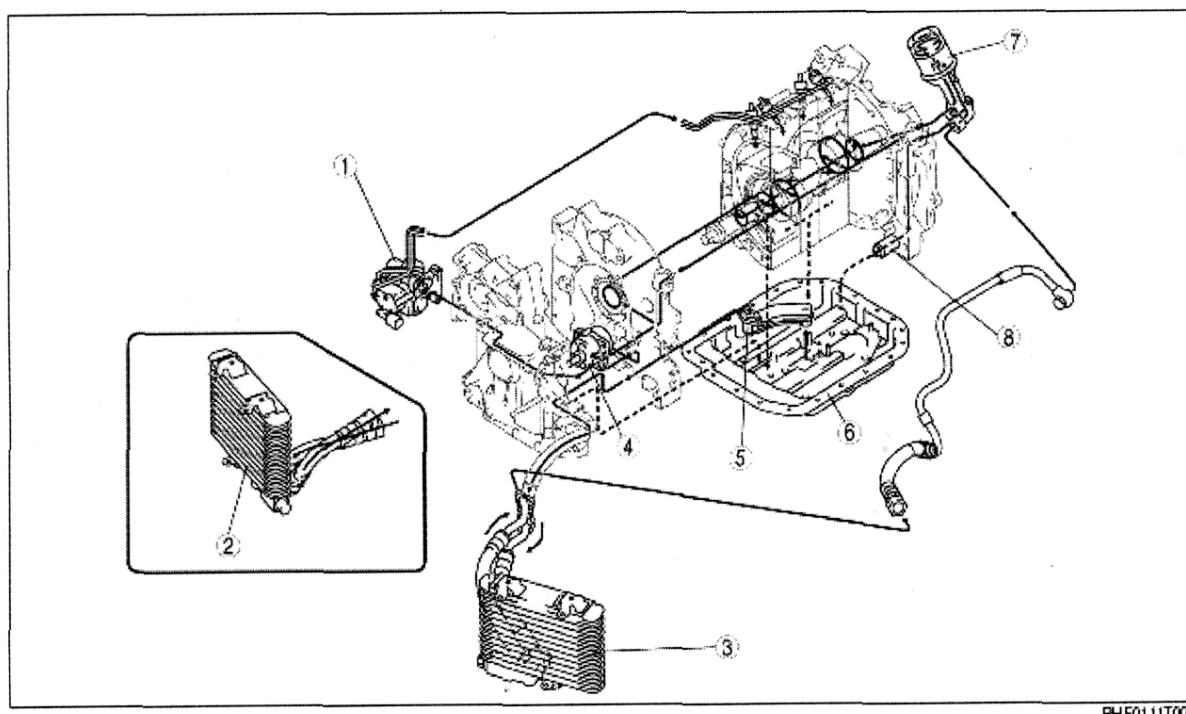
Два крайних слоя закрыты и содержат подшипники для выходного вала. Они также запечатаны в основных разделах камеры, где содержатся роторы. Внутренняя поверхность этих частей очень гладкая и помогает роторам в работе. Отдел подачи топлива расположен на конце каждой из этих частей.

Система смазки

В двигателе используется система смазки с полнопоточной очисткой масла и с подачей масла под давлением к основным движущимся деталям (подшипникам скольжения, деталям системы уплотнений, роторам и т.д.).

Масляный насос – роторный (трохоидного типа). Внутри него расположены два ведущих и два ведомых ротора с внутренним зацеплением, которые вращаются в одном направлении. Привод осуществляется цепью от эксцентрикового вала.

Масляный фильтр расположен на заднем корпусе. Для уменьшения температуры масла в систему смазки могут быть установлены один или два маслоохладителя (рис. 5).



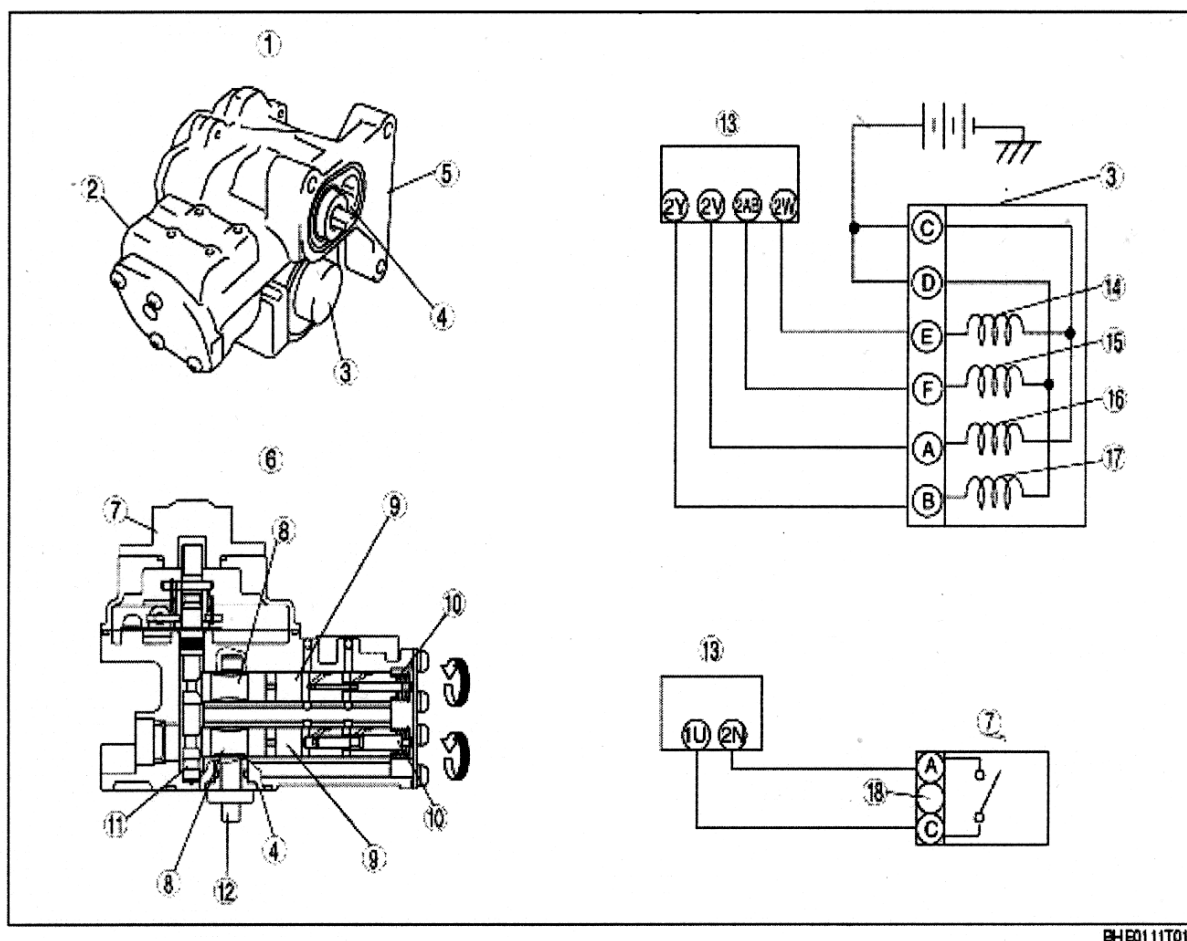
ВНЕО111Т002

Рис. 5. Схема системы смазки:

1- дозирующий масляный насос; 2 – радиатор (с двойным охлаждением масла); 3 – радиатор; 4 – масляный насос; 5 – нефтяной сетчатый фильтр; 6 – маслосборник; 7 – масляный фильтр; 8 – клапан регулятора давления масла

Для уменьшения высоты двигателя разработан специальный плоский стальной масляный поддон (высота масляного поддона 40 мм). В масляном поддоне установлены маслоуспокоитель и датчик низкого уровня моторного масла. Для уменьшения веса маслоприемник сделан из пластика.

Двигатель работает на смеси бензина с моторным маслом, так как необходима смазка деталей системы уплотнений рабочих камер. Доля подаваемого в рабочие камеры и участвующего в образовании рабочей смеси масла (по сравнению с количеством подаваемого топлива) невелика. Для регулирования количества подаваемого в рабочие камеры масла разработан дозирующий масляный насос (рис. 6, 7).



ВНБ0111Т013

Рис. 6. Дозирующий масляный насос:

1 – дозирующий масляный насос; 2 – слив масла; 3 – шаговый двигатель; 4 – подача масла; 5 – поверхность, прилегающая к двигателю; 6 – разрез насоса; 7 – датчик-выключатель; 8 – плунжер; 9 – дифференциальный плунжер; 10 – вспомогательный плунжер; 11 – регулятор; 12 – червячный механизм; 13 – блок управления двигателем; 14 – обмотка №1; 15 – обмотка №2; 16 – обмотка №3; 17 – обмотка №4; 18 – неиспользуемый вывод

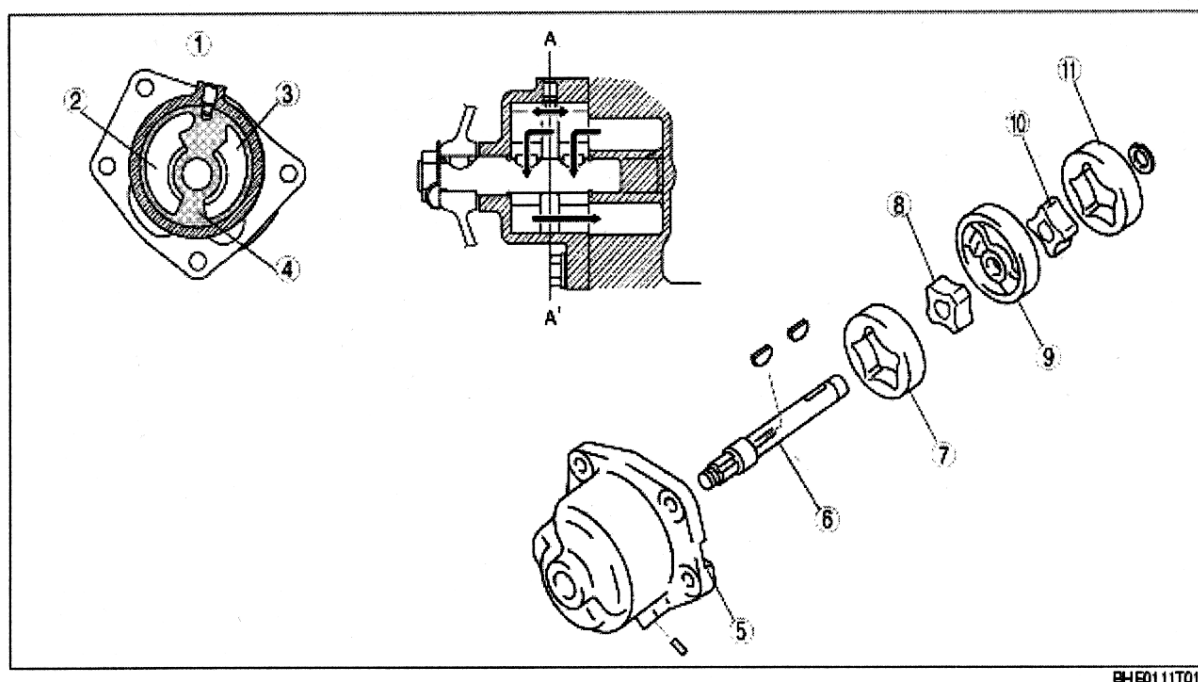


Рис. 7. Масляный насос:

1 – поперечный разрез; 2 – подача масла; 3 – слив масла; 4 – разделитель; 5 – корпус масляного насоса; 6 – вал масляного насоса; 7 – передний ведомый ротор; 8 – передний ведущий ротор; 9 – разделитель; 10 – задний ведущий ротор; 11 – задний ведомый ротор

Дозирующий масляный насос управляется блоком управления двигателем с помощью сигналов. Блок управления регулирует количество подаваемого дозирующим масляным насосом масла в зависимости от частоты вращения эксцентрикового вала, показаний датчика температуры охлаждающей жидкости и датчика массового расхода воздуха. Подача масла в рабочие камеры осуществляется масляными форсунками (рис. 9).

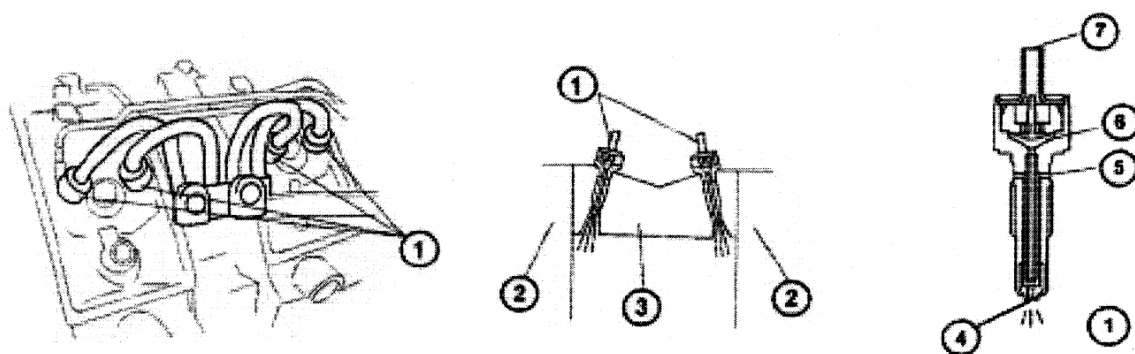


Рис. 8. Масляные форсунки:

1 – масляные форсунки; 2 – боковой и промежуточный корпус; 3 – статор; 4 – распылитель форсунки; 5 – подача масла; 6 – обратный клапан; 7 – патрубок к воздушному шлангу

На каждом статоре установлено по две масляные форсунки. Алгоритм управления дозирующим масляным насосом представлен на рис. 9. Для улучшения смазки корпусов и уплотнений масляные форсунки установлены под наклоном и впрыскивают масло на боковые корпуса ротора. Чтобы разрежение в двигателе не препятствовало подаче масла к масляным форсункам, на каждую форсунку установлен шланг, связанный с атмосферой. Для предотвращения попадания масла в воздушный шланг, когда во внутренней полости двигателя создается давление, в форсунку установлен обратный клапан.

Механизм, регулирующий количество подаваемого масла, состоит из плунжера и дифференциального плунжера, приводимого червячным механизмом. Червячный механизм приводится от эксцентрикового вала через ведущую шестерню привода дозирующего масляного насоса, находящуюся на передней крышке двигателя. Количество подаваемого масла регулируется по сигналу от блока управления двигателем, изменением хода плунжера и поворотом регулятора, связанного с шаговым двигателем. Положение шагового двигателя отслеживается с помощью датчика-выключателя, показания которого наравне с параметрами, описанными выше, используются блоком управления двигателем для расчета необходимого количества подаваемого масла.

Когда шаговый двигатель находится на шаге 52 или большем, по сигналу от датчика-выключателя в блоке управления двигателем включается алгоритм регулирования подачи масла, проходящего через дозирующий масляный насос. Когда шаговый двигатель находится ниже шага 52, устанавливается максимальная подача масла.

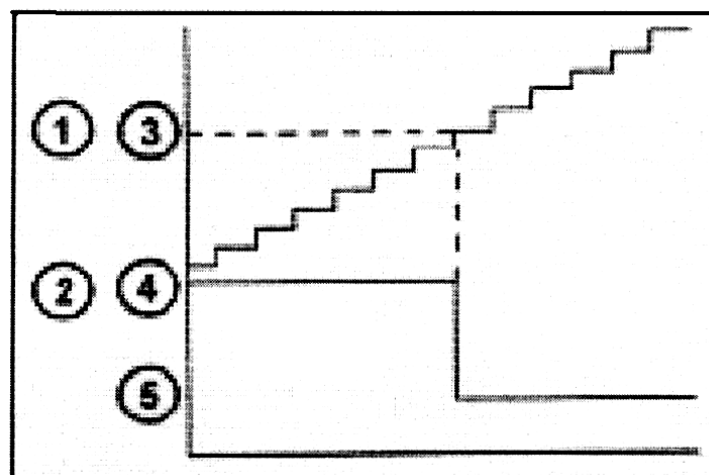


Рис. 9. Алгоритм управления дозирующим масляным насосом:

1 – шаговый двигатель; 2 – датчик-выключатель; 3 – шаг 52; 4 – выключено;
5 – включено

Эксцентрикковый вал изготовлен из высокопрочной углеродистой стали с применением индукционного упрочнения для повышения износостойкости. Эксцентрикковый вал неразъемный, с двумя коренными и двумя роторными шейками. Крепление эксцентриккового вала осуществляется с помощью подшипников скольжения в неподвижных шестернях, которые установлены в боковых корпусах.

Подшипники скольжения являются неразъемными (рис.10).

В эксцентрикковом валу выполнены каналы для смазки коренных и роторных шеек, а также подачи масла внутрь роторов для их охлаждения, для чего в эксцентрикковый вал встроены масляные форсунки. Для облегчения прогрева двигателя при холодном запуске в эксцентрикковый вал встроен редукционный масляный клапан. Когда двигатель не прогрет, редукционный клапан открывается и давление моторного масла снижается, так как часть масла сливается из вала, в результате чего давление становится недостаточным для впрыскивания масла во внутреннюю полость ротора.

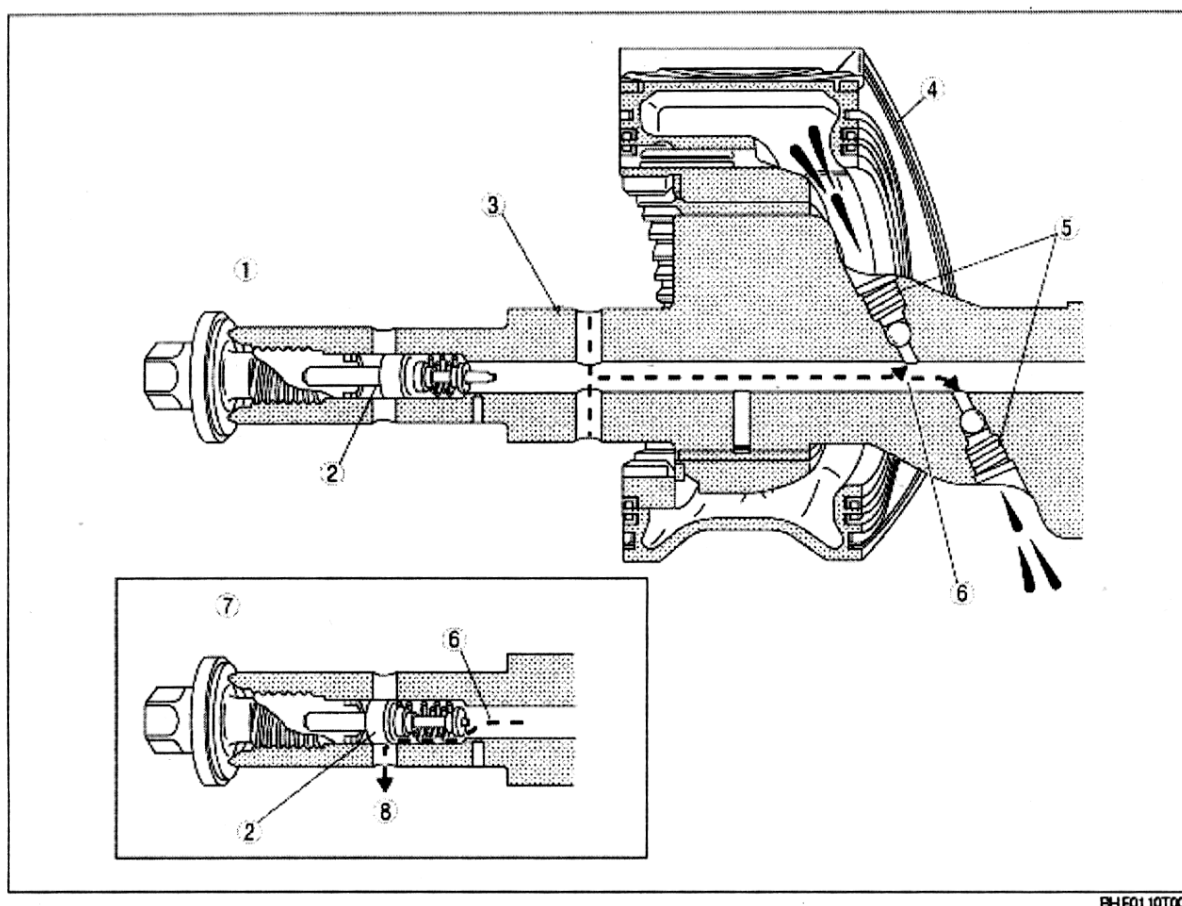


Рис.10. Эксцентрикковый вал:

1 – при температуре моторного масла 60 °С или выше; 2 – редукционный клапан эксцентриккового вала, 3 – эксцентрикковый вал, 4 – ротор; 5 – масляная форсунка; 6 – моторное масло; 7 -при температуре моторного масла ниже 60 °С; 8 – слив масла (снижение давления)

Когда двигатель прогревается, редукционный клапан закрывается и масло начинает поступать во внутреннюю полость ротора для его охлаждения. От осевого перемещения эксцентриковый вал фиксируется упорным подшипником и упорной шайбой, находящимися в передней неподвижной шестерне.

Система охлаждения

В данных двигателях используется жидкостная система охлаждения закрытого типа с принудительной циркуляцией охлаждающей жидкости. Привод насоса охлаждающей жидкости осуществляется ремнём привода навесных агрегатов.

Термостат с перепускным клапаном расположен во впускном патрубке охлаждающей жидкости и призван поддерживать оптимальную температуру в системе охлаждения, пуская охлаждающую жидкость по малому или большому (через радиатор) кругу охлаждения.

3. Преимущества и недостатки роторного двигателя Ванкеля по сравнению с традиционными поршневыми моторами

3.1. Преимущества

- Повышенная удельная мощность (кВт/кг), она практически в два раза превышает этот показатель поршневых 4-тактных двигателей. Масса неравномерно движущихся частей в двигателе Ванкеля гораздо меньше, чем в аналогичных по мощности поршневых двигателях, и амплитуда таких неуравновешенных движений заметно меньше. Это происходит из-за того, что в «поршневики» осуществляются возвратно-поступательные движения, а в двигателе Ванкеля – вращательные, планетарной схемы. К тому же в двигателе Ванкеля отсутствуют коленчатый вал и шатуны.

На повышенную мощность двигателя Ванкеля влияет и то, что такой двигатель однороторной конструкции выдаёт мощность в течение трёх четвертей каждого оборота выходного вала, в отличие от одноцилиндрового 4-тактного поршневого двигателя, который выдаёт мощность только в течение одной четверти каждого оборота выходного вала.

Именно по этим причинам с единицы объема камеры сгорания в серийном роторном моторе Ванкеля снимается гораздо большая мощность. При объёме рабочей камеры 1300 см³ Mazda RX-8 имеет мощность 150–190 кВт, а прежняя модель Mazda RX-7 с мотором такого же объема, но с турбокомпрессором выдавала 260 кВт. Именно поэтому особым признаком Mazda RX являются отличные динамические характеристики: на низкой

передаче возможно без излишней нагрузки на двигатель разогнать машину выше 100 км/ч на более высоких оборотах двигателя (8000 мин^{-1} и более).

- Двигатель Ванкеля гораздо легче механически уравновесить и избавиться от вибрации, что позволяет повысить комфортность лёгких транспортных средств типа микроавтомобилей;

- Габаритные размеры роторно-поршневого двигателя меньше в 1,5–2 раза в соотношении со сравнимым по мощности поршневым мотором. В двигателе Ванкеля на 35–40 % меньшее количество деталей (рис. 11).

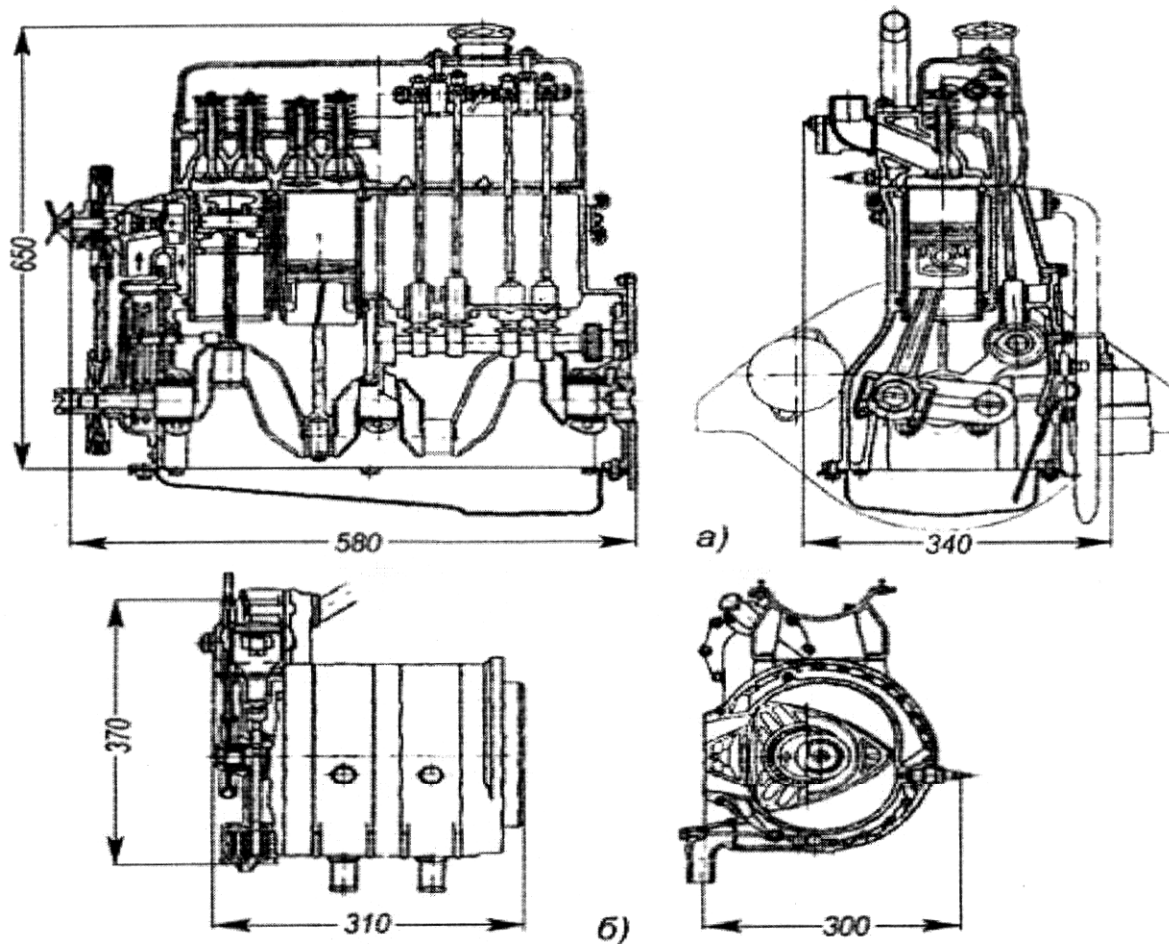


Рис. 11. Сравнительные габариты двигателей:

- а) 4-тактного 4-цилиндрового поршневого двигателя;
- б) 2-секционного роторного двигателя

3.2. Недостатки

- Малая длина рабочего хода грани треугольного ротора, хотя эти показатели напрямую с поршневым мотором сравнивать сложно – слишком различны типы движений поршня и ротора, но у двигателя Ванкеля примерно на пятую часть меньше длина рабочего хода. Тут есть одно коренное отличие двигателя Ванкеля от поршневого мотора – у поршневого идет увеличение объема в одном линейном направлении, которое совпадает

с направлением рабочего хода, а у двигателя Ванкеля – это движение сложное и только часть траектории перемещения треугольного ротора с планетарным движением становится собственно линией рабочего хода. Именно поэтому у двигателя Ванкеля топливная эффективность хуже, чем у поршневых моторов. Поэтому из-за малой длины рабочего хода очень высока температура выхлопных газов – рабочие газы не успевают передать основное свое давление на ротор, как уже открывается выхлопное окно и горячие газы высокого давления с еще не прекратившимися горение объемными фрагментами рабочей смеси выходят в выхлопную трубу. Поэтому температура выхлопных газов у двигателя Ванкеля очень высока.

- Сложная форма камеры сгорания «серповидной» формы. У такой камеры сгорания большая поверхность контакта газов со стенками корпуса и ротором. Поэтому значительная часть тепла уходит на нагрев деталей мотора, а это снижает тепловой КПД и усиливает нагрев мотора. Кроме того, такая форма камеры сгорания приводит к ухудшению смесеобразования и замедлению скорости горения рабочей смеси. Поэтому на моторе Mazda RX-8 стоят 2 свечи зажигания на одной роторной секции. Эти особенности также отрицательно влияют на уровень термодинамического КПД.

- Потенциально невысокий для роторного мотора крутящий момент. Для того чтобы снять вращение с движущегося ротора, центр вращения которого сам непрерывно осуществляет планетарное вращение по круговой траектории вокруг геометрического центра рабочей камеры, в этом двигателе применяются эксцентрично расположенные на главном валу диски. По сути дела – это элементы кривошипного устройства. То есть двигатель Ванкеля так и не смог полностью избавиться от главного недостатка классических поршневых ДВС – кривошипно–шатунного механизма. Хотя он и представлен в моторе Ванкеля в своем облегченном варианте – в виде эксцентрикового вала, но самые главные пороки этого механизма: рваный, пульсирующий режим крутящего момента и малое плечо главного элемента, воспринимающего крутящий момент – так и остались «не излеченными». Именно поэтому односекционный Ванкель малоработоспособен и нужно делать 2 или 3 роторные секции для получения нормальных рабочих характеристик, еще желательно ставить на вал дополнительно и маховик.

Кроме наличия в двигателе Ванкеля кривошипного механизма, на малый для роторного двигателя крутящий момент еще влияет и то, что кинематическая схема такого мотора устроена очень нерационально с точки зрения восприятия поверхностью ротора давления рабочих газов расширения. Поэтому лишь некоторая часть давления – около трети – переводится в рабочее вращение ротора и создает крутящий момент (рис. 12).

- Присутствие в корпусе вибраций. Дело в том, что система роторного мотора с планетарным движением рабочего элемента предполагает

неравновесное движение этого органа. То есть при вращении центр масс ротора совершает непрерывное вращательное движение вокруг центра масс корпуса и радиус этого вращения равен плечу эксцентрика главного вала мотора. Именно поэтому на корпус мотора действует изнутри постоянно вращающийся вектор силы, равный центробежной силе, возникающей на роторе. То есть ротор при вращении на вращающемся в свою очередь эксцентриковом валу имеет в характере своего движения неизбежные и выраженные элементы колебательного движения, что и приводит к неизбежности вибраций.

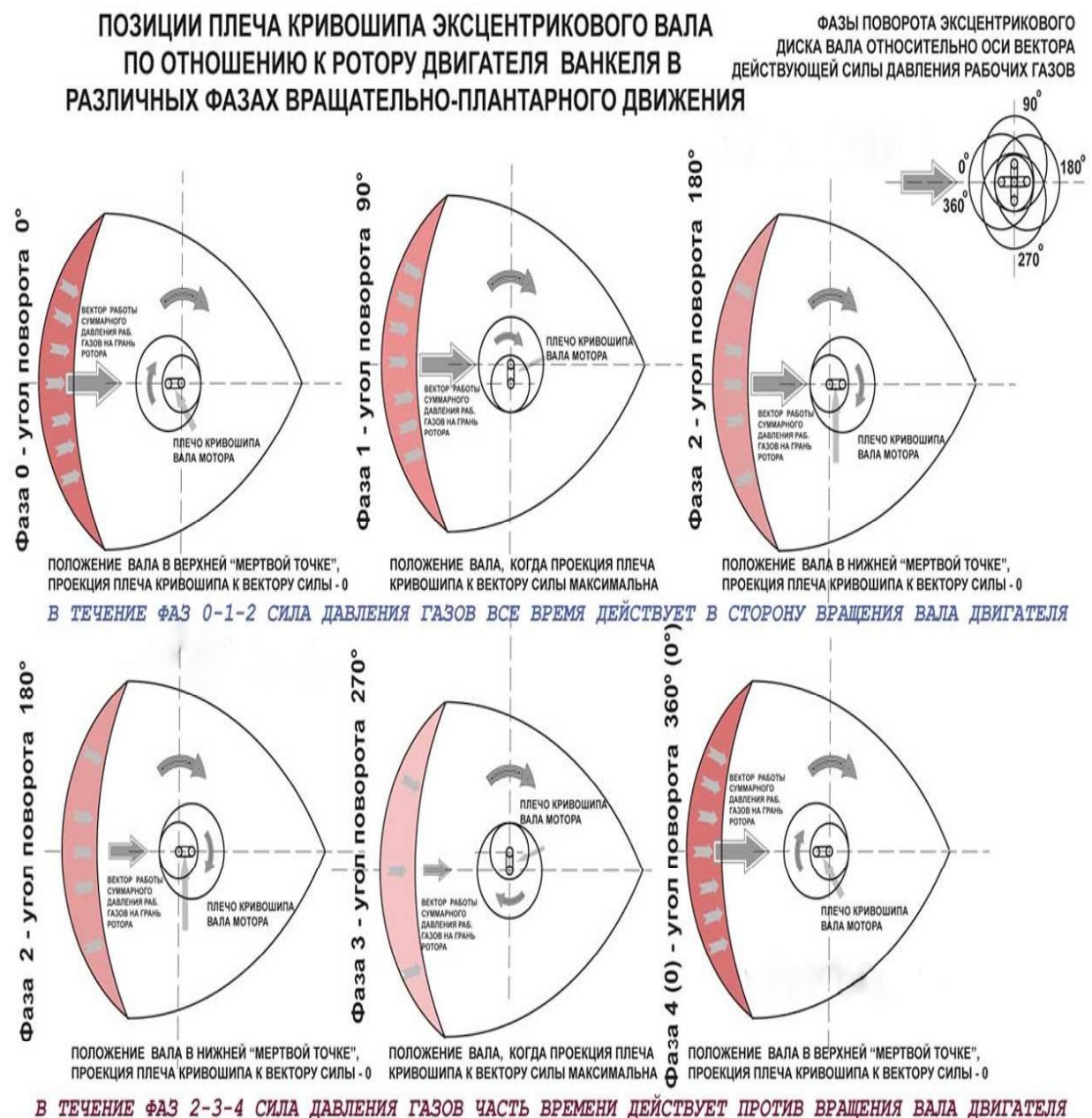


Рис.12. Позиции плеча кривошипа эксцентрикового вала по отношению к ротору

- Быстрый износ торцевых радиальных уплотнений на углах треугольника ротора, так как на них идет сильная радиальная нагрузка, неизбежная в двигателе Ванкеля по самому его принципу работы.

- Постоянная угроза прорыва газов высокого давления из полости одного рабочего такта в полость другого такта. Это происходит потому, что контакт радиального уплотнения ребра ротора и стенки камеры сгорания происходит по одной тонкой линии. При этом еще существует проблема прорыва газов через гнезда установки свечей, когда над ними проходит ребро ротора.

- Сложная система смазки вращающегося ротора. В моторе Mazda RX-8 специальные форсунки впрыскивают масло в камеры сгорания для смазки трущихся при вращении о стенки камеры сгорания ребер ротора. Это усиливает токсичность выхлопа и одновременно делает мотор очень требовательным к качеству масла. Кроме того, при высоких оборотах возникают повышенные требования к смазке цилиндрической поверхности эксцентриковой части главного вала, вокруг которой вращается ротор, и которая снимает главное усилие с ротора и переводит во вращение вала. Именно эти две технические трудности, решить которые весьма непросто, приводили к недостаточной смазке на высоких оборотах наиболее нагруженных трением деталей такого мотора, а это соответственно резко уменьшало моторесурс двигателя. Именно недостаточное решение таких технических задач приводило к очень малому ресурсу моторов Ванкеля, которые выпускал отечественный АвтоВАЗ.

- Высокие требования к точности исполнения деталей сложной формы делают такой мотор сложным в производстве. Это производство требует высокоточного и дорогого оборудования — станков, способных создавать сложные объемы рабочей камеры с криволинейной эпитрохоидальной поверхностью.